

NANAŠANJE TANKIH PLASTI PO METODI CURKA IONIZIRANIH SKUPKOV, CIS

Dr. Bruno Cvikl, Tehniška fakulteta, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 62000 Maribor, in Institut "Jožef Stefan", Univerza v Ljubljani, Jamova 39, 61111 Ljubljana

IONIZED CLUSTER BEAM THIN FILM DEPOSITION, ICB

Abstract

The description of the method for the thermal vacuum evaporation of suitable substance, used for the low-temperature deposition and epitaxy of high-quality thin films, by the ionized cluster beam method is presented.

Povzetek

V članku je opisan postopek naparovanja tankih plasti po metodi curka ioniziranih skupkov, ki rabi za nizkotemperaturno nanašanje in epitakso visokokvalitetnih tankih plasti.

1 Uvod

Široko razvejanost uporabe tankih plasti raznovrstnih materialov, zlasti na področjih ti. visokih tehnologij, ki smo ji priča dandanes, gre pripisati ogromnim raziskovalnim naporom, ki so bili v zadnjih desetletjih vloženi v obsežno področje proučevanja in krojenja lastnosti tankih plasti ter iskanja najbolj ustreznih metod preverjanja njihove kvalitete. Eno izmed tekočih temeljnih teženj raziskav je proučitev optimalne metode nanašanja tankih plasti ob upoštevanju zahtev po njihovih vnaprej predpisanih kemijskih, strukturnih, elektronskih, optičnih, mehanskih itd. lastnostih. Posledica omenjenih zahtev se je odrazila v razvoju vrste metod nanašanja tankih plasti, ki jih v grobem delimo na metode naparovanja, plazemske metode in pa kemijske postopke. Sočasno z razvojem metod nanašanja je potrebno omeniti tudi razvoj analitičnih metod proučevanja kvalitete /1/ tako dobljenih tankoplastnih materialov. Tanke plasti predstavljajo same po sebi obsežno področje raziskav fizike trdne snovi, pri čemer gre za proučevanje najraznovrstnejšega vedenja, kot npr. študij rotacijskih preklpov feromagnetnih tankih plasti, raziskave cele vrste različnih pojavov, povezanih s tuneliranjem elektronov in vrzeli, proučevanje vrste elektromagnetnih površinskih efektov, proučevanje nekaterih pojavov optične interference, raziskav nukleacije in rasti kristalov itd. Njihova neposredna uporaba v industrijske namene pa posega na področje dekoracije (npr. pozlatitev, tudi plastičnih predmetov), izdelave raznovrstnih optičnih prevlek (antirefleksne prevleke, večplastni interferenčni filtri, fluorescentna prekritja, selektivni solarni absorberji), proizvodnja elektronskih komponent (senzorjev, mikro- in optoelektronskih elementov, električnih izolatorjev, magnetnih zapisov, sončnih celic itd.), izdelave tankih plasti danih mehanskih odzivnosti (za potrebe tribologije, za difuzijske zaščite, za plasti, odporne na obrabo in erozijo, za trde prevleke obdelovalnih orodij itd.) in za izdelavo plasti s posebnim ozirom na kemijske zahteve (korozijske zaščite, katalizatorji, zaščite strojnih delov in komponent, zaščita opreme pred vremenskimi vplivi in vplivu morja itd.).

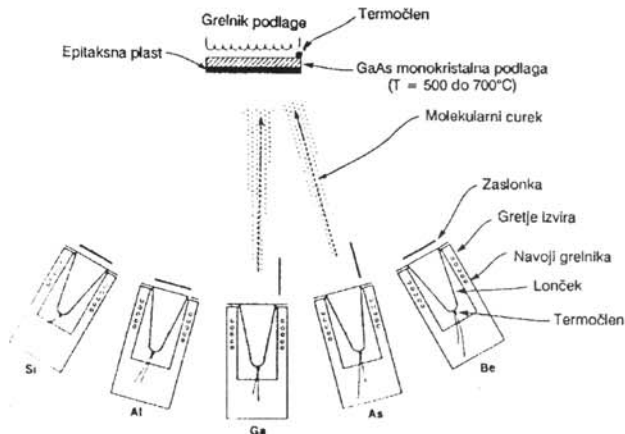
2 Nanašanje tankih plasti po metodi CIS

2.1 Metoda molekularnega curka, MBE

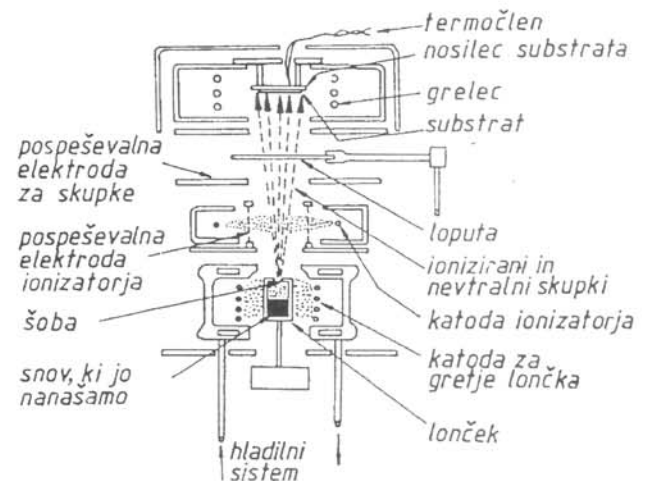
Nanašanje tankih plasti po metodi curka ioniziranih skupkov je eden od postopkov rasti na osnovi termalnega izhlapevanja atomov oziroma molekul, med katerimi je sicer najbolj poznana metoda epitakse z molekularnim curkom, MBE (molecular beam epitaxy) /2/. Ob tem se je treba spomniti, da se omenjeni postopek rasti uporablja za epitakso nanašanje tanke plasti (epitakso plast je tista, katere kristalografska struktura je določena s strukturo podlage) na monokristalu izbrane podlage. Bistvo metode so t.i. Knudsenove efuzijske celice (na krajišču odprti globoki talilni lonček, ki je obdan s ščitom, hlajenim s tekočim dušikom), iz katerih izhlapevajo atomi ali molekule v curku, vpadajo na podlago, pri čemer je le-ta segreta na temperaturo, ki ustreza kemični reakciji, nastopu epitakse in reevaporaciji presežnih vpadnih atomarnih sestavin. Celotni postopek nanašanja poteka v ultravisokem vakuumu okoli 10^{-8} Pa. Z ustreznim nadzorom curka, kar se doseže s vrtljivimi mehanskimi loputami, ki se nahajajo med podlago in Knudsenovimi celicami, je mogoče izdelati super rešetke različnih sestavin z natančno definirano debelino stične plasti. Kot je znano, se z MBE metodo izdelujejo III-V in IV-VI polprevodniške heteroplastne sestave (super rešetke), to so tvorbe, ki so sestavljene iz periodično nanosenih plasti alternativnih sestavin (npr. GaAs/AlGaAs), uporabnih zlasti na področju visokih tehnologij, kot npr. za mikrovalovne polprevodniške elektronske elemente, za polprevodniške laserje svetlovodnih telekomunikacijskih mrež itd. /3/. Shematska skica MBE naprave je prikazana na sliki 1.

2.2 Mikroskupki

Znano je, da so pri dani sestavi kemijskih elementov ali spojin fizikalne lastnosti ti. mikroskupkov, kot npr. porazdelitev električnega naboja in spina elektronov, afiniteta elektronov, ionizacijski potencial, reaktivnost z molekulami plina ali površin, elektronska struktura, temperatura tališča itd., močno odvisne od velikosti mikroskupkov in se zaznavno razlikuje od tistih za snovi, ki se nahajajo v makroskopski kondenzirani fazi. Izraz mikroskupki tukaj pomeni mikroskopski grozd (aggregates), ki je sestavljen iz nekaj deset pa do nekaj tisoč atomov. Sami po sebi so mikroskupki preveliki, da bi jih lahko popisali v smislu anorganskih molekul, toda hkrati so premajhni, da bi imeli translacijsko simetrijo in zaradi tega izkazujejo eksotične lastnosti, ki niso svojstvene niti samim molekulam niti njihovi kondenzirani (trdni) fazi. Iz omenjenega razloga se v okviru raziskav mikroskupkov /4/ išče v pretežni meri odgovore na vprašanja, kot so: kakšna



Slika 1. Shema naprave za epitakso tankih plasti po metodi molekularnega curka, MBE. Sistem se nahaja v vakuumski komori, ki na sliki ni prikazana [2]



Slika 2. Shema naprave za epitakso tankih plasti po metodi curka ioniziranih skupkov, CIS. Sistem se nahaja v vakuumski komori, ki na sliki ni prikazana [5]

je sestava in zgradba različnih skupkov - ali je enolična? Kako se elektronske, optične in kemijske lastnosti skupkov spreminjajo v odvisnosti od števila in vrste konstitutivnih atomov? Kako veliki morajo biti skupki, preden jih je mogoče popisati z razdelanimi metodami fizike trdne snovi? Kakšne so magnetne lastnosti izoliranih (golih) in pa delno nezasičenih, vezanih (oblečenih) skupkov? Slednje vprašanje posega na področje raziskav kemije površin, pri čemer je za praktične namene na področju kemijske katalize posebnega pomena proučevanje kemijske reaktivnosti skupkov in pa način njihove selektivnosti za reakcijo.

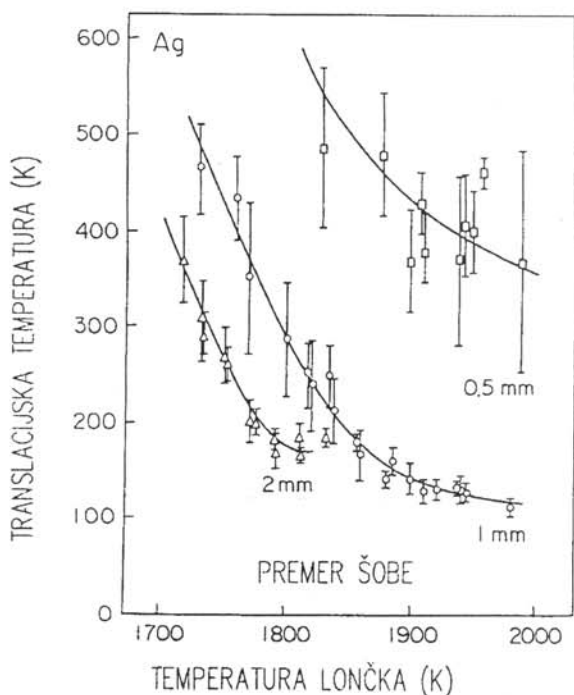
Toshinori Takagi in sodelavci [5] so leta 1972, v okviru razmišljanj o možnosti in načinu nadzora kvalitete nanosenih tankih plasti, proučili neposredni vpliv velikosti kinetične energije translacije (ioniziranih) skupkov atomov ustreznih kovin na lastnost tankih plasti, nastalih na račun njihove kondenzacije. Na takšen način osnovana nova metoda priprave tankih plasti, ki jo je avtor poimenoval: "Nanašanje po metodi curka ioniziranih skupkov (ionized cluster beam deposition, ICB)", je uspela šele nedavno vzbuditi resnični interes raziskovalcev s področja fizike tankih plasti. Vrsta do sedaj izvedenih poskusov je pokazala, da je mogoče z navedeno metodo pripraviti zelo kvalitetne tanke plasti različnih materialov. Ob tem pa velja še posebej omeniti dejstvo, da je sama narava fizikalnih in kemijskih pojavov, še danes slabo raziskana.

2.3 Metoda curka ioniziranih skupkov, CIS

Osnovna izvedba Takagijeve [5] ideje nanašanja tankih plasti po metodi curka ioniziranih skupkov, CIS je prikazana na sliki 2. Snov, ki jo želimo nanesti na izbrano podlago, je vstavljena v sicer zaprt talilni lonček z ozko šobo valjaste oblike na vrhu. Pri tem se je izkazalo, da z ozirom na kvaliteto dobljenih plasti, leži najustreznejše razmerje dolžine šobe z njenim premerom v intervalu med 0.2 do 2.0. Pri nanašanju kovin pa velja, da je za kvaliteto plasti zlasti kritičen

parameter premer šobe, ki bi naj bil od 0.5 do največ 2 mm. To stališče gre pripisati dejstvu, da je konverzija stohastičnega gibanja atomov oziroma molekul par v lončku (ta pojav se predvsem odvija v sami šobi) v translacijsko energijo curka v smer, ki jo narekuje šoba, možno le tedaj, če je povprečna prosta pot delcev v območju šobe dosti manjša, kot je njen premer. Navadno je talilni lonček izdelan iz grafita velike gostote in čistote, občasno pa je v uporabi tudi lonček iz borovega nitrida. Z elektronskim ali pa z uporovnim gretjem lonček segrejemo do te mere, da parni tlak raztaljene snovi naraste na nekaj milibarov ali celo desetih milibarov (torej bistveno več, kot pa v primeru, da je talilni lonček odprt kot npr. pri MBE metodi). Skozi šobo uhajajoče pare raztaljene snovi so podvržene adiabatni nadzvočni ekspanziji v območje visokega vakuuma v vakuumski posodi, pri čemer pride do tvorbe skupkov atomov ali pa molekul, pač v odvisnosti od uparjene snovi (v lončku), ki je lahko element ali pa kemijska spojina. Meritve translacijske hitrosti in translacijske temperature nastalega curka skupkov so pokazale [5], da je translacijska temperatura skupka (definirana s $T = 2E/3k$, kjer je E kinetična energija skupka, k je Boltzmanova konstanta) v curku bistveno nižja kot je temperatura talilnega lončka in v primeru, da le-ta narašča, se odgovarjajoča translacijska temperatura znižuje, slika 3. To dejstvo predstavlja pomembno razliko od ostalih metod napačevanja, npr. MBE, kjer je translacijska temperatura izhlapelih individualnih atomov oziroma molekul skoraj enaka temperaturi talilnega lončka in z njegovim porastom narašča tudi njihova translacijska temperatura. V splošnem pa velja pripomniti, da trenutno ne obstaja enotno stališče, kar zadeva način nastanka, poteka in pa končne velikosti v procesu adiabatne ekspanzije dobljenih skupkov. Ob tem velja omeniti, da leži vrednost kinetične energije translacije ob izstopu iz šobe približno v intervalu od 0.1 do 0.2 eV/atom.

Najnovejša dogajanja [6] kažejo, da je vsaj za primer srebra, Ag, zelo malo iz šobe izhajajočih srebrovih atomov spojenih v skupke, ki bi bili večji kot 25



Slika 3. Izmerjene vrednosti povprečne translacijske temperature skupkov srebra v curku v odvisnosti od temperature talilnega lončka, prikazane za različne premere izstopne šobe [6]

atomov, kar se ne sklada docela z tovrstnimi rezultati raziskav, izvedenih v preteklosti [5]. Kontraverznost omenjenega vprašanja prevladuje torej še vnaprej in čeprav imajo z metodo CIS nanesene tanke plasti vrsto prednosti v primerjavi z drugačnimi metodami nanašanja dobljenimi plastmi, ostaja vprašanje v kolikšni meri so za kvaliteto nanosa odgovorni predvsem veliki skupki, še naprej odprto.

Skupki, ki jih domnevno tvori do nekaj tisoč med seboj rahlo vezanih atomov in pa posamezni atomi, ki tudi izhajajo iz šobe in skupaj sestavljajo curek, potujejo skozi ionizator, kjer je curek izpostavljen prhanju z elektroni, ki letijo v transversalni smeri. V povprečju se največ, do 30%, v curku prisotnih skupkov oziroma individualnih atomov ionizira ob trkih z elektroni. V stabilnem stanju se nahajajo vsi tisti skupki, ki nosijo en sam pozitivni naboj. Dobljene ionizirane skupke lahko v primernem statičnem električnem polju pospešimo in na takšen način vplivamo na njihovo translacijsko kinetično energijo. Ionizirani skupki, preostali nevtralni skupki, kot tudi ionizirani in neionizirani atomi oziroma molekule, ki so prav tako prisotni v curku, vpadajo na izbrano podlago, kjer se kondenzirajo in na takšen način vodijo do rasti tanke plasti izbranega elementa ali spojine. V odvisnosti od nanosa je potrebno tudi pri metodi nanašanja CIS, tako kot pri MBE metodi, za doseg kvalitete tanke plasti podlago segreti na ustrezno temperaturo. Izkaže pa se, da so le-te pri metodi CIS bistveno nižje kot pri večini drugih metod nanašanja.

Običajne obratovalne razmere naprave CIS so naslednje: razmerje parnega tlaka znotraj talilnega lončka in

tlaka plinov v vakuumski komori mora biti med $10^2 - 10^5$, ionizacijski tok pri 30% do 35% stopnji ionizacije curka je približno 300 mA, pospeševalna napetost za ionizirane skupke in atome pa nekaj sto do nekaj tisoč voltov. Značilna hitrost nanašanja visokokvalitetnih tankih plasti s CIS postopkom, je od 0.1 nm/s do 10 nm/s. Delovni tlak je okoli 10^{-4} Pa, največja translacijska kinetična energija skupkov pa je nekako do nekaj sto eV/atom.

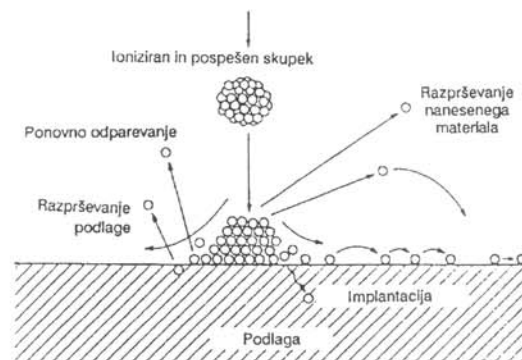
Dejstvo, da je mogoče že samo z ionizacijo skupkov, brez pospeševalne napetosti, vplivati na lastnosti tankih plasti cele vrste ionskih spojin, nam kaže na primarno, toda še nepojaseno, vlogo ionov pri procesu tvorbe plasti na površini podlage [6].

2.4 Pojavi ob nanosu skupkov na podlago

K rasti tanke plasti na površini ustrezne podlage odločujoče prispevajo naslednji pojavi: površinska vezavna energija adsorbiranih vpadnih atomov, gostota nukleacije ali pa kritična velikost za površinsko nukleacijo in pa površinska gibljivost (mobility) adsorbiranega atoma. S tem v zvezi se pogosto navaja izraz koeficient oprijemljivosti (the sticking coefficient), ki popisuje verjetnost, da se bo vpadni delec v toku kondenzacije na površini na njej tudi absorbiral. Zgoraj opisani pojavi so, kot je to dobro poznano, v pretežni meri odvisni od naslednjih pogojev nanašanja:

- gostote toka na podlago vpadnih delcev
- temperature podlage
- tlaka v vakuumski komori
- od množine nečistoč na površini podlage in pa nečistoč plinske faze v vakuumski komori
- kristalne zgradbe površine podlage
- od prisotnosti električnega naboja vpadnih delcev in/ali podlage
- od obstreljevanja z delci večjih energij.

V primerjavi z drugimi naparevalnimi metodami so pri nanašanju po metodi ioniziranih skupkov, CIS, najpomembnejše razlike prav gotovo znotraj okvira zadnjih dveh zgoraj omenjenih točk. Ker posedujejo skupki amorfno strukturo, je umestno pričakovati, da je vezavna energija atomov, ki sestavljajo skupek, manjša od tiste za dane atome v njihovi kondenzirani fazi. Ustrezno pospešeni ionizirani skupek ob vpadu na površino razpade, tako da se vpadna kinetična



Slika 4. Shematska ponazoritev najznačilnejših dogajanj ob vpadu ioniziranega skupka na površino podlage [6]

energija skupka enakomerno porazdeli na individualne atome, pri čemer pride do nastanka naslednjih pojavov /6,7/ (slika 4):

1. tvorbe preferenčnih mest (sites) nukleacije
2. čiščenja površine podlage z desorpcijo ali razprševanjem
3. (zelo) plitve implantacije
4. lokalnega segrevanja površine podlage in pa
5. migracije adatomov.

Vse navedene pojave so tudi eksperimentalno preverili in, kar je zelo pomembno, z ustrežno izbiro pospeševalne napetosti ioniziranih delcev (in/ali množino ioniziranih skupkov ter atomov, prisotnih v curku) je pri CIS postopku mogoče natančno nadzorovati fizikalne lastnosti dobljenih tankih plasti. Zdi se, da je treba prav zgoraj omenjenim pojavom pripisati dejstvo, da je s CIS postopkom mogoče doseči epitaksne tanke plasti pri bistveno višjih tlakih (pri vsaj dva reda velikosti slabšem vakuumu) in bistveno nižjih temperaturah podlage kot pri npr. MBE metodi nanašanja. Dodatna izjemna prednost CIS metode v primerjavi z MBE je tudi v dejstvu, da je z njo mogoče doseči epitakso rast tankih plasti za primer, ko se mrežni konstanti podlage in pa nanosene plasti razlikujeta tudi do 20 %. To kaže na veliko samosposobnost premagovanja notranjih mehanskih napetosti tankih plasti, dobljenih z metodo CIS. V splošnem imajo tanke plasti kovin, ki so nanosene z metodo CIS, kar zadeva ključne lastnosti, kot npr. adhezijo plasti na izbrano podlago, gostoto kondenziranih atomov v plasti, električno prevodnost plasti in pa obseg difuzije atomov v notranjost podlage, bistvene prednosti /5/ v primerjavi z istovrstnimi lastnostmi plasti dobljenih s katerokoli drugo metodo. Postopek nanašanja CIS je tudi zelo malo odvisen od električne prevodnosti podlage, kar omogoča uporabo metode za nanašanje tako kovin kot izolatorjev in to na dielektrično ali prevodno podlago.

3 Lastnosti plasti, nanosenih z metodo CIS

Do danes so z metodo CIS uspeli formirati tanke plasti različnih vrst materialov, kot so: kovine, intermetalne spojine, polprevodniški kemijski elementi in spojine, oksidi, nitridi in fluoridi ter celo nekatere organske spojine. Bežni pregled nekaterih raznovrstnih nanosov, izvedenih z metodo CIS, podaja tabela 1. Modifikacija CIS je ti. metoda RCIS (oziroma RICB), to je metoda reaktivnega nanosa s curkom ioniziranih skupkov. Tu gre za tvorbo tankih plasti, ki so nastale kot spojina elementa, ki izpari iz talilnega lončka in ustreznim reaktivnim plinom, dovedenim v vakuumsko komoro. Navadno željeni plin dovajamo v komoro pod delnim tlakom, ki je manjši od 10^{-4} mbar (da preprečimo pojav nekontrolirane plazemske razelektritve) v območje ionizatorja, kjer se plin ionizira in disociira. Nastali produkti postanejo kemično reaktivni in lahko prispevajo k reakcijam na površini podlage. V odvisnosti od velikosti ionizacijskega toka in pospeševalne napetosti je v nekaterih primerih mogoče na-

našati tanko plast spojine z vnaprej izbrano kristalno strukturo, seveda v primeru, da spojina obstaja v različnih kristalnih modifikacijah, kot je to primer za TiO_2 . Opisane pojave z drugimi metodami naprepanja ni mogoče doseči.

Kot zanimivost velja omeniti, da je bila za primer nanosa tanke plasti antimona na podlago iz amorfne ogljika, narejena skrbna komparativna raziskava /8/ kvalitete nastale plasti po metodi RCIS in pa MBE. Izkazalo se je, da so plasti, ki so bile nanešene po metodi curka (tokrat neioniziranih) skupkov, kvalitetnejše od tistih, ki so bile nanešene z bolj poznano in razširjeno metodo nanašanja MBE /8/.

Za nanašanje tankih plasti zlitin ali pa drugih spojin (npr. dopantov) se v splošnem hkrati uporablja dvoje ali več avtonomnih talilnih lončkov in pripadajočih ionizatorjev. V primeru, da želimo doseči plast predpisane stehiometrične sestave, je nadvse kritična zahteva po neodvisnem upravljanju vsakega izvira posebej (tj. temperature lončka in pa hitrosti nanašanja). Če npr. elementa Cd in Te nanašamo iz ločenih izvirov in ioniziramo samo Cd skupke, potem spojina CdTe kristalizira v kubični strukturi.

Z izbiro vrednosti osnovnih parametrov nanašanja, tj. ionizacijskega toka in pospeševalne napetosti, ki najbolj vplivata na strukturo in sestavo tanke plasti, se v splošnem doseže, da je lahko temperatura podlage nizka. Pogosto je kar enaka ali pa le malo višja od sobne temperature. Posledica omenjenega dejstva je močno zmanjšanje interdifuzije, kar neposredno omogoča tvorbo zelo tankih plasti z nadvse ostro definiranimi stičnimi ploskvami (interface). To je demonstriral Takagi /9/ z nanosom super rešetke pri 250°C iz skupno 60 alternirajočih plasti CdTe debeline 6.5 nm in pa 8.0 nm debele PbTe plasti. Na podlago, ki je bila iz InSb je bila predhodno nanosena 150 nm debela epitakso plast CdTe. Optični absorpcijski spekter tako dobljene večplastne strukture (super rešetke) je prikazan na sliki 5.

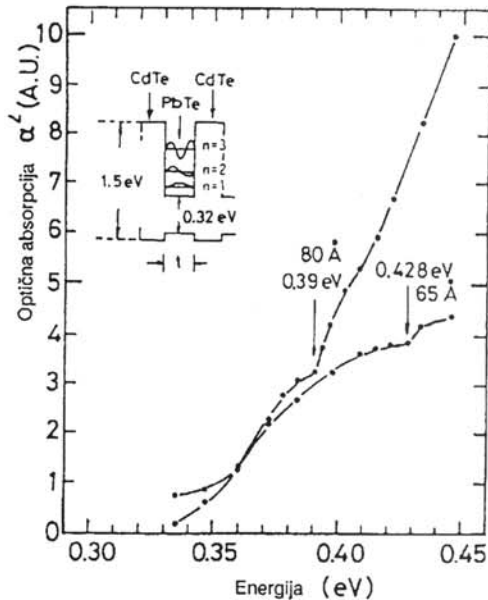
Naprave za nanašanje tankih plasti po metodi curka ioniziranih skupkov so komercialno dosegljive na tržiščih na Japonskem in ZDA in se, zaradi prednosti metode CIS, ko gre za obvladovanje problemov, kot npr. elektromigracije, stabilnosti stičnih plasti, interdifuzije, površinske morfologije itd., najpogosteje uporabljajo za: 1. metalizacijo Si rezin in Al inter-povezave prevodnih plasti v VLSI tehnologiji, 2. izdelavo nekaterih polprevodniških spojin, kot npr. GaAs itd., kjer je prednost metode CIS v doseganju višjih hitrosti nanašanja za epitaksne plasti, možnosti nanašanja na večje površine, možnosti uporabe nižje temperature podlage (posledica je zmanjšanje števila raznovrstnih defektov), večje variabilnosti metode dopiranja in 3. tvorbo izolacijskih plasti v tehnologiji integriranih vezij, kot npr. "gate" oksidne plasti za MOS, izolacijska področja med aktivnimi elementi, pasivizacijska prekritja in mednivojske dielektrične plasti za večplastne medsebojne povezave. Slednje je mogoče izvesti z CIS nanosom SiO_2 plasti med samim tehnološkim procesom, kajti pasivizacija z CIS lahko poteka že pri temperaturi podlage v intervalu od 200

TABELA 1. Pregled nekaterih najpomembnejših, po metodi curka ioniziranih skupkov, CIS, nanosenih tankih plasti in njihova uporaba /5/

Tanka plast/ podlaga	Posp. nap. (kV)	Temp. podlage °C	prednosti CIS metode (uporaba)
POLPREVODNIKI			
Si/(100)Si Si/(111)Si	6-8	400-620	Nizkotemperaturna epitaksa v visokem vakuumu (10^{-7} - 10^{-6} mbar), plitek in izrazit-p stik (polprevodniške naprave)
Amorfni Si/ steklo	0-6	200	Toplotna stabilnost sončne celice, tankoplastni transistorji
Ge/(100)Si Ge/(111)Si	0.5-1	300-500	Nizko temperaturna epitaksa v visokem vakuumu (10^{-7} - 10^{-6} mbar), plitek in izrazit p-n stik (polprevodniške naprave)
GeAs/GeAs	1-6	550-600	Epitaksa v visokem vakuumu (10^{-7} - 10^{-6} mbar), (polprevodniške naprave)
GaP/GaP	4	550	Nizko temperaturna epitaksa v visokem vakuumu (10^{-7} - 10^{-6} mbar) (cenene LED)
ZnS/NaCl	1	200	Monokristalna rast (optične prevleke, ac-dc elektroluminiscenčne celice z majhnimi impendancami)
ZnS + Mn/ steklo	1	200	Monokristalna rast (optične prevleke, ac-dc elektroluminiscenčne celice z majhnimi impendancami)
CdTe/steklo	2	250	Izboljšana monokristaliničnost domen infrardeči detektorji
CdTe,PbTe/Si, InSb	5	250	Zelo tanke in monoatomarne plasti, nizkotemperaturna rast (optoelektronske naprave, super mreže)
KOVINE			
AU,Cu/steklo	1-10	sobna	Močna adhezija, velika gostota, dobra el.prevodnost (visoko ločljiva vezja,optične prevleke)
Pb/steklo	5	sobna	Možnost kontrole kristalne strukture, močna adhezija, gladka površina, izboljšana termična stabilnost (superprevodniške naprave)
Ag/Si(n-tip)	5	sobna	Omski kontakti brez legiranja

Tanka plast/ podlaga	Posp. nap. (kV)	Temp. podlage °C	prednosti CIS metode (uporaba)
Ag/Si(p-tip)	5	400 (legiranje)	Omski kontakt (polprevodniška metalizacija)
Ag,Sb/GaP	2	400	Omski kontakt, močna adhezija (polprevodniška metalizacija)
Al/SiO ₂ ,Si	0-5	sobna - 200	Možnost kontrole kristalne strukture, močna adhezija, omski kontakt pri nizki temperaturi (polprevodniška metalizacija)
OKSIDI, NITRIDI, KARBIDI IN FLUORIDI			
CaF ₂ / Si(111),(100)	0-5	400-700	Nizkotemperaturna rast, gladka površina (tridimenzionalne naprave)
MgF ₂ /steklo	0-5	100-300	Močna adhezija (optične prevleke)
FeOx/ Si, steklo	3	250	Možnost kontrole višine prepovedanega pasu (sončne celice)
GaN,ZnO/ steklo	0	450	Nizkotemperaturna rast plasti GaN na amorfni podlagi (cenene LED, fotokatode)
SiC/Si, steklo	0-8	600	Možnost kontrole kristalne strukture (površinska zaščitna plast)
KOVINSKE SPOJINE			
CuAl/steklo	0-5	sobna	Možnost kontrole kristalne strukture, gladka površina (spominske enote)
CuNi/steklo	0-5	sobna	Možnost kontrole kristalne strukture (uporovni lističi)
Preferenčno orientiran MnBi/ steklo	0	300	Prostorska urejenost magnetnih domen, optični spomin velike gostote (magnetno optični spomin)
CdFe/steklo	0	200	Termična stabilnost in urejenost, amorfna struktura (magnetno optični spomin)
Preferenčno orientiran PbTe/ steklo	0-3	200	Visok Seebeck-ov koeficient, nizka toplotna prevodnost (učinkovit termoelektrični pretvornik)
Preferenčno orientiran ZnSb/ steklo	1	140	Termično stabilna amorfna struktura, visok Seebeck-ov koeficient (učinkovit termoelektrični pretvornik)

do 300°C, kar je bistveno manj od običajnih temperatur 1200°C pri npr. MOS ali CMOS tehnologijah. Nekatere druge uporabe metode CIS so razvidne iz tabele 1.



Slika 5. Optični absorpcijski spekter super rešetke 60 plasti CdTe/PbTe z debelinami $t = 6.5$ nm oziroma 8.0 nm, nanesene z metodo ioniziranih skupkov, [9]

4 Metoda nanašanja CIS - raziskave na IJS

Zaradi relativne cenenosti, sorazmerno enostavne vakuumske tehnologije, predvsem pa zaradi izjemno široke možnosti izbora visokokvalitetnega nanašanja raznovrstnih materialov (kovin, polprevodnikov, termoelektričnih materialov, dielektrikov, magnetnih materialov in celo nekaterih organskih spojin) smo izbrali in leta 1989 dokončali izgradnjo osnovne verzije pilotske naprave za nizkotemperaturno nanašanje tankih plasti po metodi curka ioniziranih skupkov. Naprava, katere namen je bil pridobivanje izkušenj, nam rabi za osnovne raziskave na področju fizike stika kovina/polprevodnik, hkrati pa daje možnosti za pripravo nekaterih, senzorjev (npr., p-i-n Ge/Si dioda kot infrardeči detektor).

5 Sklep

V članku opisani postopek vakuumskega nanosa raznovrstnih materialov na površino izbrane podlage po metodi curka ioniziranih skupkov, CIS, omogoča pripravo visokokvalitetnih epitaksnih tankih plasti, ki so posebnega pomena v znanosti in tehnologiji.

Za ionizirane skupke je značilno veliko razmerje med maso skupka in njegovim električnim nabojem. Z ustrezno izbrano vrednostjo pospeševalnega statičnega električnega polja je mogoče natančno določiti kinetično energijo atomov rahlo vezanih v skupek, ki vpadajo na površino podlage. Ionizirani in nevtralni skupki se na površini vsled trka razletijo na individualne atome, ki po njej difundirajo in zaradi svoje energije povzročajo lokalno mikrosegrevanje površine, zelo plitko implantacijo v podlago, tvorbo aktivacijskih središč za nukleacijo in v majhni meri tudi razprševanje atomov s površine podlage. Zaradi mikrosegrevanja in trkov s površinskimi atomi nečistoč, povzročajo omenjeni delci lokalno čiščenje površine in temu pojavu pripisujejo vzrok, da poteka postopek nanašanja po metodi CIS pri nižjih tlakih in nižji temperaturi podlage kot z drugimi metodami nanašanja.

Epitaksa po metodi curka ioniziranih skupkov je, tako se dozdeva, tudi znotraj strokovnih skupin sorazmerno slabo poznan postopek rasti visokokvalitetnih tankih plasti. Pričakovati je, da se bo uporaba metode CIS prav zaradi vrste prednosti, nenazadnje tudi zaradi možnosti nanosa najraznovrstnejših snovi, v svetovnem merilu pričela uveljavljati tudi na takšnih področjih raziskav, kot so super rešetke. To je t.i. fizika kvantnih heteroplastnic oziroma kvantnih jam, ki je raziskovalno nadvse zahtevno področje, vendar je zelo zanimivo za različne uporabe.

Zahvala

Za pomoč pri konstrukciji, izgradnji in preiskovanju pilotske CIS naprave ter na njej izvedenih eksperimentih se zahvaljujem sodelavcem E. Krištofu, M. Koželju, T. Mrdenu in pa F. Žitniku ter F. Moškoni.

6 LITERATURA

- /1/ "Solid-State Physics Source Book", S.P.Parker Editor, McGraw-Hill, N.Y. 1988, glej tudi V. Marinkovič, Vakuunist 1, 3, (1992)
- /2/ M. A. Herman, H. Sitter "Molecular Beam Epitaxy", Springer Series in Material Science 7, Springer-Verlag, 1989
- /3/ Michael Shur, "Physics of Semiconductor Devices", Prentice Hall, 1990
- /4/ "Elemental and Molecular Clusters", uredniki: G.Benedek, T.P.Martin in G. Pacchioni, Springer Series in Material Science 6, Springer-Verlag, 1988
- /5/ Toshinori Takagi, "Ionized-Cluster Beam Deposition and Epitaxy", Noyes Publications, ZDA, 1988, glej tudi, T. Takagi, Vacuum, 36, 27 (1986)
- /6/ W.L.Brown, M.F.Jarrold, R.L.McEachern, M. Sosnovski, G.Takaoka, H.Usui and I.Yamada, Nucl. Instruments and Meth. in Phys. Research B59/60, 182, (1991)
- /7/ Horngming Hsieh and R.S.Averback, Phys. Rev. B42, 5365, (1990)
- /8/ G.Fuchs, M.Treilleux, F.Santos Aires, B.Cabaud, P.Melinon, and A.Hoareau, Phys. Rev. A40, 6128, (1989)
- /9/ T.Takagi, H.Takaoka and Y.Kuriyama, Thin Solid Films, 126, 149, (1985)